

文章编号:0451-0712(2007)02-0107-04

中图分类号:U414.750.2

文献标识码:B

# 开级配沥青稳定碎石(ATPB) 骨架结构的细观分析

陆阳<sup>1</sup>, 张蓉<sup>2</sup>, 廖敬梅<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学土木工程学院 成都市 610031; 2. 四川省交通厅公路规划勘测设计研究院 成都市 610041)

**摘要:** 视开级配沥青稳定碎石 ATPB 骨架为由随机分布于约束空间的离散矿料组成, 在此前提下分析混合料的细观特征, 发现 ATPB25 骨架的构成不仅与矿料最大粒径有关, 对矿料级配也非常敏感, 其中粒径大于 6.0 mm 的矿料主要起骨架作用, 而粒径为 4.75~6.0 mm 的矿料在作为混合料骨架结构组成单元的同时, 也可能起着填充骨架间空隙的作用, 并随矿料级配形式的不同而变化。

**关键词:** 开级配沥青稳定碎石; 集料骨架; 细观结构

沥青混合料是粗细集料、填料、沥青胶结料组成的复合体, 并通过各组分材料相互接触, 形成复合体的细观结构, 从而决定了复合体的传力方式。按集料组成特性, 沥青混合料分为骨架空隙结构、悬浮密实结构和骨架密实结构。对骨架空隙结构, 沥青混合料的强度和稳定性主要取决于粗集料间的嵌挤力, 胶结材料的性质和物理状态对结构强度的影响则相对较小, 特别是大粒径沥青混合料, 其粗集料骨架结构与混合料的力学指标关联性较为明显<sup>[1]</sup>。因此, 研究由粗集料构成的混合料骨架结构的特征, 有助于深入理解混合料组成设计理论, 指导工程实践。

然而, 传统的沥青混合料矿料配合比的设计是基于经验的设计方法, 其级配控制参数为矿料间隙率, 不能说明各集料组成的相互作用和最终的体积测定。为评估集料级配, 文献<sup>[2]</sup>提出了考虑各组成集料充填特性的贝雷法, 从细观角度划分构成混合料骨架结构的集料组分。近年来, 贝雷法已拓展至沥青混合料的配合比设计<sup>[3,4]</sup>, 突破了传统经验设计方法的框架。应当指出, 实际道路工程中, 沥青混合料粗集料骨架及细集料的充填作用实为符合某种统计规律的现象描述, 而不能简单理解为次一级粒料在大一级颗粒形成的空隙中的规律性填充<sup>[5]</sup>。鉴于此, 文献<sup>[6]</sup>将随机理论与数值模拟方法相耦合, 研究了骨架密实结构混合料的骨架组成, 发现粗集料骨架

结构的构成既不是完全的有序也不是完全的随机。作为数值模拟方法的进一步应用, 作者对开级配沥青稳定碎石(ATPB)细观骨架结构特性进行了分析, 就矿料级配对 ATPB 骨架的影响展开了讨论。

## 1 ATPB 骨架结构的数值计算模型

本文主要探讨矿料级配与 ATPB 骨架结构的关系, 故将集料简化为按一定级配分布组成的球形体。ATPB 混合料受压时, 外力通过集料的嵌挤作用传至混合料的下部, 因此任一处于稳定状态的集料, 其重心的投影须位于支承该集料的其他球体组成的平面内, 而混合料内部集料之间互成点与点的接触形式。另一方面, 从混合料整体看, 个体集料将随机地存在于给定空间中的某一位置。现假定集料的级配密度分布曲线在区间 $[x_1, x_2]$ 内为 $f(x)$ , 其中 $x_1, x_2$ 为区间内集料最小及最大粒径。按照随机理论, 选取粒径为 $P_i$ 集料的概率应满足:

$$\int_{x_1}^{x_2} f(x) dx = G \quad (1)$$

式中:  $x_1 \leq x_i \leq x_2$ ;  $G$  为伪随机变量, 由乘同余数法产生并表示为:

$$G_{j+1} = a \cdot G_j \pmod{M} \quad j=0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

式中:  $M, a$  分别为模数及乘子;  $G_0$  为初始值;  $a,$

$G_0 \in (0, M)$ 。

按式(2)连续选取伪随机数  $G$ , 即可确定粒径为  $x_i$  的不同集料。类似地, 如果集料在试件内按统计规律均匀分布, 则可以确定任意颗粒在给定空间内的随机投放点。

作为混合料骨架基本组成单位的集料, 它既是施力体又是承力体, 所以处于空间稳定位置集料应满足势能最小原理, 即在可行域内, 集料距离混合料下部边界高度最小。因此混合料骨架的构成模拟分两步进行: 首先是矿料的随机生成, 包括矿料的粒径、在空间的初始位置; 然后通过集料的下落、滚动, 确定其空间的最终稳定位置。混合料骨架结构的计算机模拟实现过程中, 矿料的构造是一个顺序过程, 而且一旦生成, 则认为已处于稳定状态, 与边界条件共同形成待生成矿料的约束。

根据上述原理, 作者开发出沥青混合料骨架结构组成程序。程序采用面向对象的设计思想, 以便考虑不同几何形态或边界条件下的混合料的骨架构造。考虑到混合料内部结构的模拟需大量集料单元的集成, 难以逐个考察各单元与其他集料之间的相互接触关系, 因此有必要利用可视化技术以了解混

合料内部结构。鉴于上述两点, 决定在 VC++ 开发平台上进行程序的研制, 并以单一粒径球体以及两种粒径球体组成结构框架的情况, 对程序的可靠性进行了验证<sup>[6]</sup>。

## 2 ATPB 的细观骨架特征分析

沥青混合料的配合比设计包括集料的配合比组成设计及最佳沥青用量的选择两个部分。按强度理论, 沥青混合料内的摩擦阻力由集料颗粒间的相互作用提供, 而沥青所提供的胶结作用则体现为混合料内部的凝聚力及抗拉强度。传统的 AC 型连续级配沥青混合料矿料组成设计以最大密度为主要控制指标, 许多情况下, 粗集料颗粒孤立存在于包括细集料的沥青砂胶介质中, 其作用力的传递需通过沥青砂胶介质进行。与之相反, 开级配沥青稳定碎石 ATPB 的矿料组成中小于 4.75 mm 的集料含量甚少(表 1), 组成的混合料间隙率一般在 18% 以上, 属骨架空隙结构, 其作用力的传递通过组成骨架的粗集料进行。当然, 作为沥青混合料骨架结构组成单元的粗集料的定义, 只能理解为符合某种统计规律的相对概念, 它随混合料最大公称尺寸的变化而变化。

表 1 ATPB25 及 AM25 矿料级配范围<sup>[7-8]</sup>

级配类型	通过下列方筛孔(mm)的质量百分率/%												
	31.5	26.5	19.0	16.0	13.2	9.50	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
ATPB25	100	80~100	60~100	45~90	30~82	16~70	0~3	0~3	0~3	0~3	0~3	0~3	0~3
AM25	100	90~100	50~80	43~73	38~65	25~55	10~32	2~20	0~14	0~10	0~8	0~6	0~5

对组成 ATPB 的矿料, 不同粒径组的相对数量直接影响骨架细观结构。为简化问题, 假定滞留于任意一标准筛上的集料均连续且呈均匀分布, 即公式(1)中的密度函数分段连续。按表 1, 由矿料级配中值曲线变换可得关于粗集料各分组占粗集料总体积的百分率。由于密度函数以集料样本容量为变量, 而级配曲线以集料体积(设集料颗粒表观密度为恒定值)为度量单位, 故以变换后的百分占有率除以各分组粒径集料各自的平均体积, 然后进行归一化处理, 得各组粗集料以样本容量为度量单位(取 ATPB25 级配中值曲线)的百分占有率如图 1。因此, 计算需分二步随机产生一矿料, 即首先确定集料的分组, 再由下式确定矿料粒径:

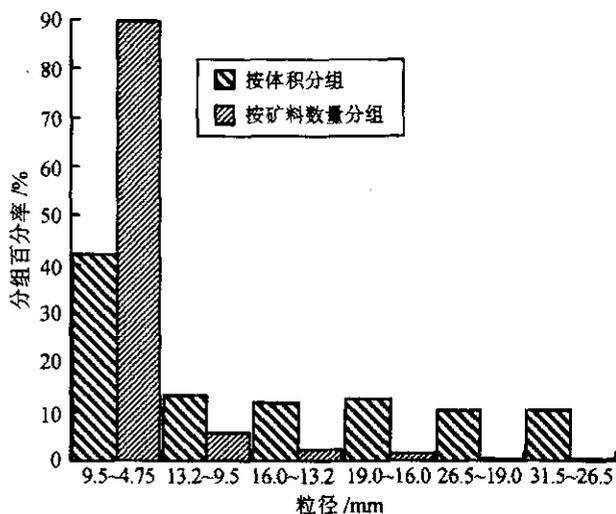


图 1 ATPB25 集料(级配中值)分组百分率

ATPB25,  $d_1$ 、 $d_2$  分别等于 4.75 mm、9.5 mm、13.2 mm、16 mm、19 mm、26.5 mm 和 31.5 mm。

$$d = d_1 \cdot \sqrt{\frac{1}{1 - G \cdot [1 - (d_1/d_2)^2]}} \quad (3)$$

式中:  $d_1$ 、 $d_2$  为粗集料各组粒径的上下限, 对于

应用所开发的程序,按表1中所列的矿料级配范围生成 ATPB25 沥青混合料骨架结构,其边界取直径为 205 mm、高 305 mm 的圆柱体。模拟得 ATPB25 沥青混合料骨架在上述边界条件约束下的间隙率为 0.404。

在混合料集成基础上,以集料配位数(颗粒与其他集料接触的数目)为参数,讨论混合料骨架结构。计算得 ATPB25 骨架集料配位数频率分布如图2。从统计分布规律上看,沥青稳定碎石 ATPB25 的配位场变化范围相当宽,以 6.18 作为平均配位数(以频率为权函数的配位数之和),其最小值等于3,最大值超过20。值得注意的是,混合料中存在有配位数等于3的集料,这是保持其稳定所要求的配位数最小值。当该矿料为骨架结构组成单元具有传力功能时,要求配位数应不小于4,换句话说,配位数小于4的这部分集料仅起填充作用。按体积计算,配位数小于4的集料中,粒径为4.75~6.0 mm 的矿料占81%以上;未发现配位数小于4的集料中有粒径大于9.5 mm 的矿料。

为进一步说明,现考察 ATPB25 中 6.0~31.5 mm 及 9.5~31.5 mm 粒径范围内集料配位数的频率分布。由图2可见,ATPB25 中仅考虑粒径大于 6.0 mm 的集料时,配位数频率分布曲线向右移,出现少量配位数为0的零接触矿料,按矿料数量计约17.5%的集料的配位数小于4,平均配位数减小至5.20。进一步若考虑粒径大于9.5 mm 的集料,配位数频率分布曲线右移更加明显,且分布范围变窄,其最大配位数为9,平均配位数仅2.89。更应引起注意的是,按矿料数量计,此时高达44.5%的集料的配位数小于3,表明 ATPB25 中相当一部分粒径大于9.5 mm 的集料“悬浮”于粒径小于9.5 mm 的集料中(图3)。由此推论,粒径大于6.0 mm 集料的主要功能是形成 ATPB25 混合料骨架结构,而粒径4.75~6.0 mm 的集料虽然是 ATPB25 骨架的组成部分,但可能起着充填骨架间空隙的作用,而且按集料体积计,起充填作用的矿料占4.75~6.0 mm 集料总量的10%以上。

### 3 ATPB 骨架的矿料级配敏感性分析

ATPB 为大空隙的沥青稳定碎石,但其矿料配合比显著不同于传统的粗粒式沥青碎石 AM。对比 ATPB25 与粗粒式 AM25 的级配组成可以看出,ATPB 几乎不含小于 4.75 mm 的集料,这是构成 ATPB 大空隙的必要条件;另一方面,ATPB 中粒径

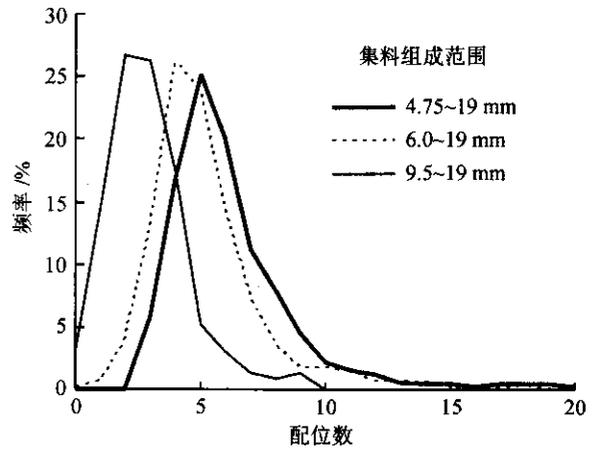


图2 ATPB25 骨架集料配位数频率分布

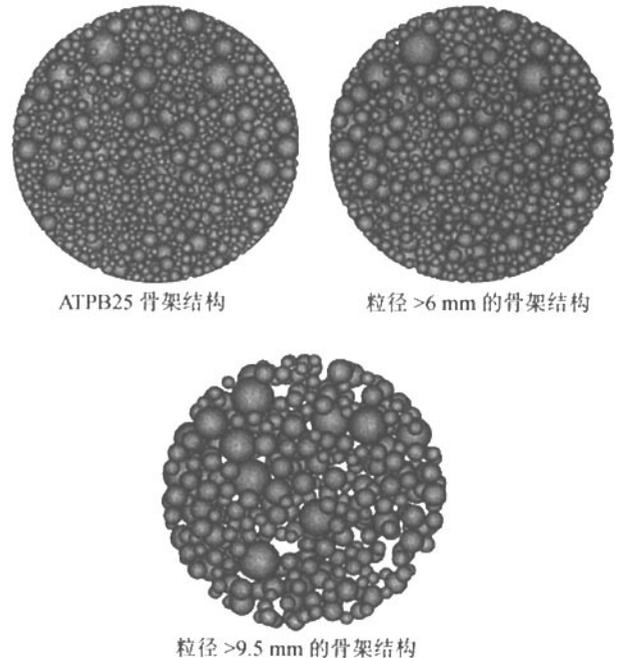


图3 ATPB25 不同粒径范围的集料空间分布  
(试件高度区段:70~130 mm)

26.5~19 mm 矿料用量的减少以及 9.5~4.75 mm 矿料用量增大,形成了更明显的 S 型级配曲线(图4)。值得注意的是,ATPB 的矿料级配变化范围明显大于粗粒式 AM 级配允许变动范围,例如筛孔 13.2 mm 的矿料通过率,ATPB25 级配允许变动范围较传统的 AM25 增加约 25 个百分点(表1)。因此,研究级配的变动对 ATPB 骨架构成的影响是有益的,这不仅涉及集料配合比设计控制标准,对指导施工也具有重要的参考意义,因为工程中实际使用材料与配合比设计采用材料往往不一致,需在保证 ATPB 骨架结构相对稳定前提下,指明使用材料的允许波动范围。

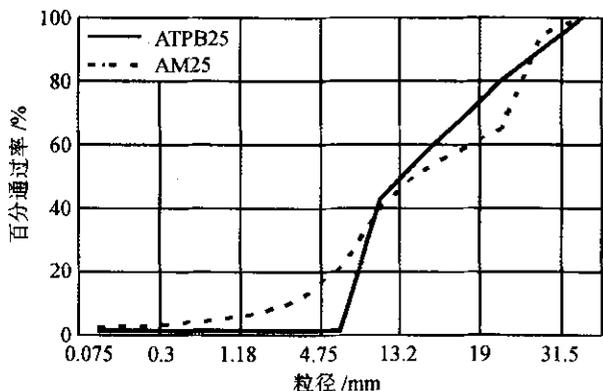


图4 ATPB25及AM25矿料级配中值百分通过率

现以表1给定的ATPB25的上界为级配目标函数,相对于配合比取级配中值时,其集料组成中粒径小于9.5 mm的集料含量(按体积百分通过率)增加了60%,相应地,组成ATPB25骨架结构的成分也应随之变化。事实上,以表1上界为计算配合比生成的ATPB25混合料的平均配位数约等于6.43,较以级配中值为配合比时增大约4%;但若以粒径大于6.0 mm的集料为骨架,混合料的平均配位数减小至5.0,减小幅度明显大于按级配中值组合成混合料骨架的情况。因此当ATPB25级配曲线偏于规范推荐的上限时,粒径为4.75~6.0 mm集料的骨架作用将增大而填充作用则减小。

值得注意的是,按表1中ATPB25级配曲线中值与上界取值,集料最大粒径相差两个量级,势必对骨架结构产生影响。为说明这一点,考察ATPB25级配曲线呈S形分布时的骨架结构,其中13.2 mm以上粒径集料取表1给定范围中值,9.5 mm以下粒径集料按表1给定范围取下界值。此时,集料组成中粒径小于9.5 mm的集料含量减小约60%。仍采用随机方法生成混合料骨架结构,得混合料平均配位数约等于6.04,若仅考虑粒径6.0 mm以上的集料,其平均配位数变化不大,约等于6.0。所以,呈S形级配组成的ATPB25中,粒径范围为4.75~6.0 mm的集料对骨架结构的影响不及以表1中值为级配目标函数时大。进而可以认为,ATPB混合料骨架结构既与集料最大公称尺寸有关,也随级配改变。

最后应当指出,有别于传统的体积指标,配位场是从细观角度定量描述混合料骨架结构,概念更为

清楚。例如计算中按表1中值及S型级配取值,得ATPB25混合料空隙率分别等于0.404、0.417,但空隙率仅是宏观指标,不能说明混合料内部的充填情况。而从细观角度分析,得2种组合下配位数小于4的集料分别占集料总数的5.8%、14.1%。注意到大于6.0 mm的集料主要起骨架作用,因此取S型级配时,粒径6.0~4.75 mm的集料的填充作用更为突出,混合料的图像分析也证实了这一点。

#### 4 结论

升级配沥青稳定碎石ATPB具有矿料级配粗、空隙率高的特点,其空间骨架结构方式是决定混合料传力方式的主要因素。为探讨其细观特征,作者视ATPB骨架由离散矿料组成,并采用数值模拟方法随机生成。分析生成的混合料骨架,发现在现行规范推荐范围内,ATPB25骨架的构成既与集料最大粒径有关,也受到矿料级配的影响,其中粒径大于6.0 mm的矿料主要起骨架作用,而粒径为4.75~6.0 mm的集料在作为骨架组成单元的同时,也可能处于大一级颗粒形成的空隙中,起着填充作用,显著影响混合料空隙率。

#### 参考文献:

- [1] 刘中林,王富玉,郝培文,陈忠达,戴经梁. 大粒径沥青混合料组成结构的研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(7).
- [2] Vavrik W R, Pine W J, Huber G, Carpenter S H, Bailey R. The Bailey method of gradation evaluation: The influence of aggregate gradation and packing characteristics on voids in the mineral aggregate [J]. Asphalt Paving Technology, 2002, 70.
- [3] 李岷,戴旺,沥青稳定碎石排水基层级配设计方法研究[J]. 湖南交通科技, 2006, 32(1).
- [4] 于新,吴建浩,贝雷方法应用探讨[J]. 公路, 2003, (8).
- [5] 田波,侯芸,杜二鹏,王龙. 沥青混合料中骨架结构特征的评价[J]. 同济大学学报, 2001, 29(5).
- [6] 陆阳,周永江,张蓉. SMA粗集料结构的数值模拟[J]. 中国公路学报, 2006, 19(1).
- [7] JTJ014-97,公路沥青路面设计规范[S].
- [8] JTGF40-2004,公路沥青路面施工技术规范[S].